

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760441

研究課題名（和文）ラーメ・マックスウェルの平衡条件式に基づく斜面上の応力分配モニタリング手法の開発

研究課題名（英文）Monitoring technique development for stress distribution in ground slopes based on the Lamé-Maxwell equations of equilibrium

研究代表者

ピパットポンサー ティラポン (Pipatpongsa Thirapong)

東京工業大学・学術国際情報センター・准教授

研究者番号：10401522

研究成果の概要（和文）：

本研究では、荷重伝達メカニズムの基本な概念を調べるため、応力場の理論的解析法および物理模型実験に注目した。ラーメ・マックスウェルの平衡条件式に基づく応力解析による計算手法の妥当性を評価するために、砂丘、砂谷、土留め擁壁や斜面における応力分布の理論解を計算し、それらの模型実験の応力分布と比較することによって検討した。最後に、亀裂の方向を観察することによる主応力方向のモニタリング手法として、斜面上に円筒型空中石膏プラスターを利用することの有効性を検討することを試みた。

研究成果の概要（英文）：This research aims to investigate the basic concept of load transfer mechanisms by focusing on physical model tests and theoretical analysis of the stress field. In order to perform a quantitative evaluation by stress analysis based on the Lamé-Maxwell equations of equilibrium, theoretical solutions of stress distribution in sand heap, sand valley, earth retaining wall and slope were developed and verified by physical models. Finally, the use of the cylindrical air gypsum plaster on the slopes as a monitoring method of principal stress direction stress was examined by observing the direction of the crack.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：土質力学・地盤解析

### 1. 研究開始当初の背景

地盤構造物における応力分布の推定と測定は防災に必須である。応力測定により主応力方向を知ることができるが、内部応力場は分からない。しかし、複数の測定点の値を繋げ、得られた主応力線の情報により、ラーメ・マックスウェルの平衡条件式を用いて、応力解析を行うことができる。このように、応力分布形態を明らかにし、特徴的な分布荷重の定量的な評価が行える。

### 2. 研究の目的

本研究は、斜面掘削作業中の安全性を高める

ため、斜面表面に挿入した円筒型空中石膏プラスターの亀裂・変形による主応力軸線を推測するとともにラーメ・マックスウェルの平衡条件式に基づく応力分布を算出することによって、安価なモニタリング手法開発を目指すとともに、斜面上の応力分配モニタリング手法に対して、その有用性を検証する。それに加えて、ラーメ・マックスウェルの平衡条件式に基づく応力解析による計算手法の妥当性を評価するために、砂丘、砂谷、土留め擁壁や斜面における応力分布の理論解を計算し、それらの模型実験の応力分布と比較することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、現場に適用するモニタリング方法を展開していくために、実測に必要な道具・テクニックと解析に必要なパラメータ・入力データを調べて、模型実験を中心に、研究データを集め、基本的なノウハウに関して準備した。模型実験に使う珪砂の強度・材料特定を測定するとともに、多数の超小型土圧計、砂丘の支持面、砂谷の土槽、斜面フレーム、擁壁模型、PIV カメラなどの実験に必要な装置を揃えた。まず、単純な境界条件をもつ砂丘、砂谷、斜面、土留め擁壁に対して、それぞれ模型実験を実施した。主応力線の情報を利用して、地盤内の応力を再現するとともに、模型実験内部での応力の分布の推定を試みた。

### 4. 研究成果

ラーメ・マックスウェルの平衡条件式を用いて、各地盤工学問題のアーチ効果を解明して、地盤内における主応力軸の仮定した場合の応力分布の理論解と実験結果を包括的な比較・検討した。解析結果は実験結果を再現していることが確認された。特徴における応力の定量的評価を試みた結果をまとめると、以下の通りである。

#### (1) 砂丘の模型実験

ラーメ・マックスウェルの平衡条件式に基づく砂丘底面の荷重分布についての理論解を求めた。異なる形成手法によって作られた砂丘・砂谷の地盤内の応力分布を比較すると、それぞれの結果が若干違うことから、砂丘・砂谷底面の応力分布は形成過程に依存することがわかった。



長方形板上堆積砂丘



網ふるい降下法



空中降下法



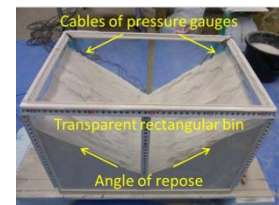
境界壁撤去法

砂丘及び砂谷に関する具体的な問題に対して、空中降下法と網ふるい降下法、境界壁面撤去法のそれぞれで比較することによって

形成過程が応力分布へ与える影響を実験的に確認した。実験結果と理論解の分布形は同様な傾向を示すことも検証された。把握した荷重伝達メカニズムに従って、平衡条件式を満たすような解析理論を構築して、アーチ効果理論を援用した数理的手法を開発した。

#### (2) 砂谷の模型実験

緩い平面砂谷下の鉛直圧力分布について、小型土層を用いた模型実験により鉛直応力を測定し、試料の作成方法の違いによる密度、底面の剛性・摩擦の有無が鉛直応力分布に与える影響について示している。また、これらの実験の結果と楕円型方程式系の自己相似解との比較を行うことにより解析解の妥当性を検討し、この評価手法が本実験の条件下における応力分布を過小評価する結論を得ているが、放物型偏微分方程式系の自己相似解との比較結果では、よい傾向が得られた。

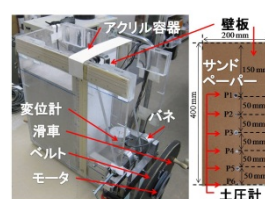


掃除機による掘削最中の砂崩れ

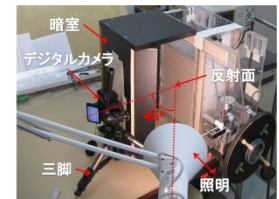
掘削後の両斜面の安息角

#### (3) 土留め擁壁の模型実験

物理模型実験を用いた剛な擁壁の水平移動に伴う背面側に作用する主働側圧の変化に関する一連の研究が行われた。層状に緩く詰めた背面地盤から離れる水平方向に移動した擁壁の変位量がダイヤルゲージで測定すると同時に、その変化に応じた裏込め土の挙動はデジカメを用いた粒子画像流速測定法によって観察された。擁壁の背面側に直角方向に作用する土圧は、壁面に埋設された小型土圧計より求めた。壁面が動いた場合の主働土圧は、アーチ効果に基づく理論式と実験結果と比較したところ、良好な一致が得られているため、擁壁背面側地盤におけるアーチ作用を確認することができた。



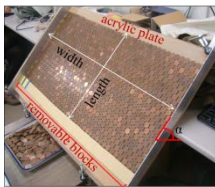
アクリル製擁壁の小型模型実験



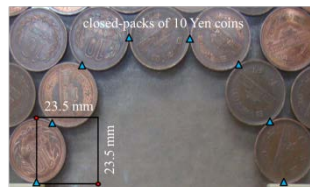
粒子画像流速測定法システム

#### (4) 十円硬貨を使った模型斜面

本実験における目的は、斜面法尻掘削によるアーチ形成破壊の幾何学的形状を検討することである。模型斜面は傾斜させたアクリル板上に十円硬貨を敷き詰めることによって作成した。硬貨を敷き詰めている区間は模型斜面のアーチ形成に重要な影響を与える要素であるので、まず硬貨の並べ方について考えた。十円硬貨の内部摩擦角は、かみ合わせによる硬貨間の応力計算で測定することができる。次に不連続性斜面の破壊メカニズムを把握するために、アクリル板の斜面の角度を変えて、法尻部の中心から十円硬貨を左右に一個ずつ模型斜面が破壊するまで抜き取っていき、最後に破壊したときの掘削幅を記録する。また、法尻掘削によるアーチ形状を画像データで詳しく分析するために、デジタルタイザによって読み取られたアーチ形状の座標を用いて三角形、懸垂線形、放物線形、弓形の式に近似した。その平均二乗誤差を求め、それぞれ誤差を比較した結果、アーチ形は弓形で最も精度よく推定できることが分かった。アーチ効果によって生じるアーチ形状を特定することで、ラーメ・マックスウェルの平衡条件式から得られる理論値と比較し、アーチ作用を考慮に入れて結論を出している。



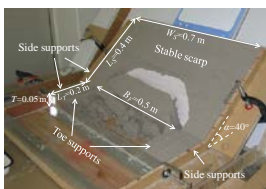
敷き詰める十円玉で作成した模型斜面



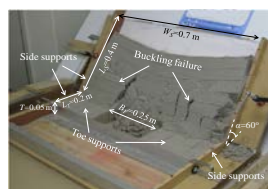
デジタルタイザによって読み取られたアーチ形状の座標

#### (5) 締固め砂を使った模型斜面

斜面の破壊に伴う坑内への影響を定量的に評価することは困難であるため、崩壊を起こさない最大の法尻掘削幅を予測することが必要とされている。



アーチ形成による破壊機構 (穏斜面)



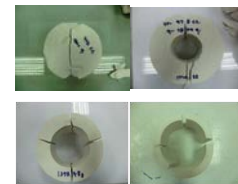
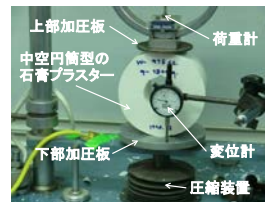
座屈褶曲による破壊機構 (急斜面)

また、坑内の斜面に沿ってアーチを形成して安定させる方法は、鉱山工学分野における採掘法として、斜面法尻掘削の設計において利点を与える。本研究で用いた模型斜面は、側

面を平行な剛性壁によって拘束し、均一になるように締固めた複数の層からなる土で作製している。安定する掘削幅と斜面の傾斜角との関係を実験的に得るため、斜面崩壊を起こすまで、斜面の勾配を徐々に増加させる方法と斜面の勾配は固定し法尻部を徐々に掘削する2つの方法で、厚さ、幅及び長さを変えた模型斜面を用いて一連の実験を行った。それに加えて、ラーメ・マックスウェルの平衡条件式に基づく理論と比較し、法尻部の掘削のための設計を考案することができた。

#### (6) 円筒型空中石膏プラスター

現場での実行可能性を検討するために、円筒型空中石膏プラスターの強度を収集した。脆性材料を対象とする供試体の引張り強さのデータを収集する手法として、圧裂引張試験を実施し、養生期間、水プラスター比、中空比率などの影響を把握するために、鉛直変位の一定速度で与えた中空円筒型および中空円筒型の石膏プラスターの破壊荷重を求め、フィールドへの適用性を検討した。十分な精度が得られないところもまだあるが、亀裂発生方向と主応力方向と一致すると確認できた。



中空円筒型石膏プラスターの圧裂引張試験



フィールド実験



観察された亀裂

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

(1) T. Pipatpongsa, *Statically admissible stress solutions in gravitating loose earth of wedge and valley with plane slopes inclined at angle of repose*, Granular Matter (印刷中), 査読有り.

(2) T. Pipatpongsa, T. Matsushita, M. Tanaka, S. Kanazawa, K. Kawai. *Theoretical and experimental studies of stress distribution in wedge-shaped granular heaps*, Acta Mechanica Solida Sinica (印刷中), 査読有り.

(3)M.H. Khosravi, T. Pipatpongsa, J. Takemura. Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode, Geotechnique (印刷中), May 2013, 査読有り.

doi: 10.1680/geot.12.P.021

(4)S. Thay, S. Kitakata, T. Pipatpongsa, A. Takahashi. Measurements of vertical pressure profile beneath a planar valley of loose sand and its estimation based on self-similar solution of elliptic equation system, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics), Vol. 68, No. 2, pp. I21-I32, Sep 2012, 査読有り.

(5)M.H. Khosravi, L. Tang, T. Pipatpongsa, J. Takemura, P. Doncommul. Performance of counterweight balance on stability of undercut slope evaluated by physical modeling, International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 193-205, Apr. 2012, 査読有り.

doi: 10.3328/IJGE.2012.06.02.193-205

(6)M.H. Khosravi, T. Pipatpongsa, A. Takahashi, J. Takemura. Arch action over an excavated pit on a stable scarp investigated by physical model tests, Soils and Foundations, Vol. 51, No. 4, pp. 723-735, Aug. 2011, 査読有り.

doi:10.3208/sandf.51.723

[学会発表] (計26件)

(1) T. Pipatpongsa, T. Takeyama, Atsushi Iizuka, H. Ohta. Central pressure drop induced by passive arch action of materials prone to liquefaction underneath embankments due to basal settlement, 第62回理論応用力学講演会講演論文集, paper No. OS20-05, 2013年3月6日, 東京工業大学, 東京, 査読無し.

(2)H. Hirai, M.H. Khosravi, T. Pipatpongsa. Geometrical shape of arch formed by collapse of undercut slope, 第62回理論応用力学講演会講演論文集, paper No. OS13-04, 2013年3月6日, 東京工業大学, 東京, 査読無し.

(3)M.H. Khosravi, J. Takemura, T. Pipatpongsa. Centrifugal modeling of undercut slopes subjected to pseudo-static loading, The 10th CUEE conference proceedings, pp. 523-532, 2013年3月1日, 東京工業大学, 東京, 査読無し.

(4)C. Leelasukseree, T. Pipatpongsa, M. H. Khosravi, N. Mavong. Stresses and a failure mode from physical and numerical models of undercut slope lying on inclined bedding plane, The 7th Asian Rock

Mechanics Symposium (ARMS2012), pp. 1295-1304, Coex Center, Seoul, South Korea, 2012年10月15日, 査読有り.

(5)T. Pipatpongsa, M.H. Khosravi, J. Takemura, D. Stathas, C. Leelasukseree. Cohesive arch action in laterally confined block of moist sand placing on an inclined bedding plane, The 7th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS2012), pp. 1378-1387, Coex Center, Seoul, South Korea, 2012年10月15日, 査読有り.

(6)S. Thay, S. Kitakata, T. Pipatpongsa, A. Takahashi. Physical model of surcharge loading to the intersecting ridge between two slopes, The 2nd International Conference on Transportation Geotechnics (IS-Hokkaido2012), Taylor & Francis Group, pp. 749-754, Coex Center, Seoul, South Korea, 2012年10月15日, 査読有り.

(7)T. Pipatpongsa. Statically admissible stress fields in loose sand heaps under the closure of polarized principal axes, The 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2012), China Science Literature Publishing House, p. 246, 2012年8月19日, China National Convention Center, Beijing, China, 査読有り.

(8)T. Pipatpongsa, M.H. Khosravi, D. Stathas, J. Takemura. Effect evaluation of tensile strength to a critical width of undercut slope aligned with a bedding plane, Proceedings of the 47th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp. 777-778, 2012年7月14日, 八戸工業大学, 青森, 査読無し.

(9)T. Matsushita, T. Pipatpongsa, N. Mungpayabal, P. Wattanachai. Possible use of hollow plaster cylinders for indicating the axis of major principal stress in soft rock surface, Proceedings of the 47th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp. 853-854, 2012年7月14日, 八戸工業大学, 青森, 査読無し.

(10)L. Tang, S. Thay, T. Pipatpongsa, A. Iizuka. Weight transmission in conical sand pits stored in a rectangular bin, Proceedings of the 47th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp. 636-664, 2012年7月14日, 八戸工業大学, 青森, 査読無し.

(11)T. Pipatpongsa, T. Matsushita, B. Vardhanabhuti. Taylor series solutions of stress profiles in mound of loose sand inclining at angle of repose, Proceeding of the 17th National Convention on Civil Engineering, GTE049, page 1-10, 2012年5

月9日, Centara Hotel & Convention Centre Udon Thani Hotel, Udon Thani, Thailand, 査読有り.

(12)C. Leelasukserree, N. Mavong, M. H. Khosravi, T. Pipatpongsa. Physical and numerical models of undercut slope lying on steeply inclined bedding plane, Proceeding of the 17th National Convention on Civil Engineering, GTE045, page 1-12, 2012年5月9日, Centara Hotel & Convention Centre, Udonthani, Thailand, 査読有り.

(13)S. Thay, S. Kitakata, T. Pipatpongsa, S. Leungvicharoen. Development of physical models for investigating stress distribution in loose sand stored in rectangular bin, Proceeding of the 17th National Convention on Civil Engineering, GTE021, page 1-12, 2012年5月9日, Centara Hotel & Convention Centre, Udonthani, Thailand, 査読有り.

(14)S. Thay, T. Pipatpongsa, A. Takahashi. Principal stress trajectories in planar sand ditch under the closure of polarized principal axes, 第61回理論応用力学講演会、東京大学生産技術研究所, 講演論文集、GS01-02, 2012年3月7日, 査読無し.

(15)M. H. Khosravi, T. Pipatpongsa, J. Takemura. Pseudo-static analysis of passive arch action in undercut slopes against earthquake, The 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering (9CUEE) & 4th Asia Conference on Earthquake Engineering (4ACEE), Center of Urban Earthquake Engineering, pp. 665-672, 2012年3月6日, 東京工業大学, 東京, 査読無し.

(16)M. H. Khosravi, L. Tang, T. Pipatpongsa, J. Takemura, P. Doncommul. Physical model tests of an undercut slope on moist sand stabilized by counterweight balance, Proceedings of the International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011), pp. 669-676, 2011年11月7日Burstwood Entertainment Complex, Perth, Australia, 査読有り.

(17)T. Pipatpongsa, S. Heng, A. Iizuka, H. Ohta. Static pressure distribution beneath granular wedges sloped at angle of repose, Proceedings of the 5th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 2, pp. 924-932, 2011年8月31日, Sheraton Grande Walkerhill, Seoul, South Korea, 査読有り.

(18)唐 麟, タイ ソクワン, ルアングビッチャルアンサシコン, ピパットポンサー ティラポン. 蟻地獄の生息場所調査および巣穴の

安息角測定, 第8回地盤工学会関東支部発表会発表講演集, 地盤工学会関東支部, pp. 185-188, 2011年11月10日, 山梨県立男女共同参画推進センター, 査読無し.

(19)S. Thay, M. H. Khosravi, T. Pipatpongsa, A. Takahashi. Weight transmission in planar sand ditch stored in a rectangular bin, 第46回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 46, pp. 351-352, 2011年7月5日, 神戸国際会議場, 査読無し.

(20)M. H. Khosravi, S. Kitakata, T. Pipatpongsa, J. Takemura. Experimental analysis of failure zone behind retaining walls under active translation mode, 第46回地盤工学研究発表会, pp. 1355-1356, 2011年7月5日, 神戸国際会議場, 査読無し.

(21)松下忠己, 唐麟, ヘイン・ソクビル, ピパットポンサー・ティラポン. 長方形板上の堆積砂丘の自重による分布荷重伝達, 第46回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp. 349-350, 2011年7月5日, 神戸国際会議場, 査読無し.

(22)S. Siriteerakul, T. Pipatpongsa, T. Takeyama. Analytic solutions for stresses in an inverted conical sand valley with principal axes polarized everywhere, 46th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp. 351-352, 2011年7月5日, 神戸国際会議場, 査読無し.

〔図書〕(計1件)

T. Pipatpongsa, H. Ohta. Chapter 13: Threshold of friction stabilizes self-weight transmission in gravitating loose sand heaps, Geotechnical Predictions and Practice in Dealing with Geohazards, Springer, May 2013.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.geo.gsic.titech.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

ピパットポンサー ティラポン  
(Pipatpongsa Thirapong)

東京工業大学・学術国際情報センター・  
准教授

研究者番号: 10401522

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者

竹山 智英 (Takeyama Tomohide)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 00452011